

Славінська О. С., д-р техн. наук, Щодро О. Є., д-р техн. наук, Козарчук І. А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВУЗЛА РОЗГАЛУЖЕННЯ ВІДКРИТИХ ПОТОКІВ У ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

Анотація. В статті розглянуто особливості кінематичної і турбулентної структури вузла розгалуження відкритих потоків у зонах впливу мостових переходів із груповими отворами. Проаналізовано теоретичний та експериментальний досвід з питань злиття потоків і вторинних течій поперечної циркуляції. На основі лабораторного експерименту досліджується структура зони злиття відкритих турбулентних потоків. Наводиться спосіб визначення траєкторій і напрямків внутрішніх течій на основі поля ізотак. Представлено результати розрахунку турбулентних характеристик досліджуваних потоків і їх виконано аналіз. Робиться висновок про характер течії у вузлах злиття в зоні впливу мостових переходів і особливості зародження внутрішніх течій.

Ключові слова. мостовий перехід, зона впливу, злиття відкритих потоків, турбулентність, вторинні течії, експеримент.

Аннотация. В статье рассмотрены особенности расчета речного потока в зонах влияния мостовых переходов с групповыми отверстиями, связанные с учетом эффекта внутренних течений на гидродинамические характеристики потока. Проанализировано теоретический и экспериментальный опыт по вопросам слияния потоков и вторичных течений поперечной циркуляции. Для учета влияния внутренних течений предлагается использовать двухпараметрическую $k-\epsilon$ модель совместно с алгебраическими уравнениями для рейнольдсовых напряжений. На основе эксперимента исследуется структура зоны слияния открытых турбулентных потоков. Приводится способ определения траекторий и направлений внутренних течений на основе поля изотак. Делается вывод о

характере течения в узлах слияния и особенностях зарождения внутренних течений.

Ключевые слова. Мостовой переход, зона влияния, слияние открытых потоков, турбулентность, вторичные течения, эксперимент.

Summary. The article describes peculiarities of kinematic and turbulent structure of the node of open branching flows in the affected zones of bridges with group openings. Theoretical and experimental experience on merging flows and secondary currents of transverse circulation was analyzed. The structure of confluence area of open turbulent flows is researched on the basis of the experiment. A method of determination of trajectories and directions of internal currents basing on the isotachs field is adduced. The results of calculation of turbulent characteristics of the researched flow are represented and analyzed. The conclusion about the nature of the flow at the nodes of confluence and features of internal currents origin is made.

Key words. Bridge crossing, affected zone, open streams confluence, turbulence, secondary flows, experiment.

Постановка проблеми

Одним з важливих питань при гідравлічних розрахунках мостових переходів є визначення розмірів групових отворів. На розмір отворів впливає розподіл витрати при розгалуженні потоків. Відділення рукавів від основного русла відбувається під впливом причин топографічного або геологічного характеру. Структура потоку при цьому має складний просторовий характер і зазнає сильного впливу з боку внутрішніх течій, які необхідно враховувати при розрахунках. Особливості руху води в місцях розгалуження відкритих потоків вивчаються з метою удосконалення розв'язування задач регульованої взаємодії потоків із гідротехнічними спорудами, проведення гідравлічних та руслових розрахунків при оцінці і прогнозах руслових деформацій.

Аналіз досліджень і публікацій

Згідно з дослідженнями [1] злиття відкритих потоків у відносно вузьких руслах, можна виділити три можливих режими злиття:

1. Режим, який характеризується відсутністю видимих деформацій водної поверхні. При цьому потік, який виходить з бічного каналу, притиснутий до внутрішньої стінки лотка, а епюри розподілу осереднених швидкостей майже рівномірні по ширині і глибині потоку.

2. Режим, який характеризується значними місцевими похилами водної поверхні в створі бічного каналу. При цьому утворюється коса хвиля невеликої висоти, потік пульсує, а стабілізація епюри осереднених швидкостей спостерігається на відстані $\frac{12,5...15}{h_{k2}}$, де h_{k2} – критична глибина сумарного потоку;

3. Режим, який характеризується поперечним рухом потоку. При цьому бічний потік набігає на протилежну стінку лотка з утворенням завихрення, спостерігається пульсація руху водної маси, а стабілізація епюри спостерігається на ділянці завдовжки $\frac{17,5...20}{h_{k2}}$.

Асиметрія поперечного перерізу потоку в зоні розгалуження виникає внаслідок розвитку відривних течій, які здійснюють перенесення руслоформуєчих наносів і таким чином призводять до значних деформацій русла [3, 6, 11].

При розгалуженні відкритих потоків виникають вторинні течії поперечної циркуляції двох видів: вторинні течії першого виду, обумовлені відцентровими силами на повороті русла, і вторинні течії другого виду, що виникають як у скривленому, так і в прямолінійному потоці, обумовлені нерівномірністю розподілу турбулентних напружень по живому перерізу русла, а саме нестійкістю основного осередненого руху потоку [7-9]. Сталі поперечні течії розвиваються в місцях значного викривлення струменів потоку і завжди мають характер замкнутих циркуляцій.

Більшість моделей, які описують такі складні течії, враховують тільки частину перерахованих особливостей, тому використання для замикання вихідної системи руху моделі другого порядку – двопараметричної k - ε моделі турбулентності спільно з алгебраїчними рівняннями для рейнольдсових напружень – стає особливо актуальним, оскільки дозволяє врахувати анізотропію процесу перенесення [5, 7].

Таким чином, мета роботи полягає в дослідженні кінематичної структури вузла злиття відкритих потоків.

Основна частина дослідження

З метою дослідження кінематичної структури вузла злиття відкритих потоків використовувалися експериментальні дослідження, проведені під керівництвом О. Є. Щодро в Національному університеті водного господарства та природокористування [12]. Дані дослідження присвячені визначенню пропускної здатності споруд на перетині траси головного каналу з тимчасовими і постійними водотоками. Експерименти проводились в лабораторії НУВГП. На двох гідравлічних моделях масштабу 1:70 і 1:32 досліджувалася робота трубчастого випуску, коли в каналі відбувалося злиття спокійних потоків. Русло мало складну трапецієподібну форму і однорідну шорсткість. Похил дна каналу дорівнював нулю. Розміри експериментальної установки 324x250 см (рис. 1).

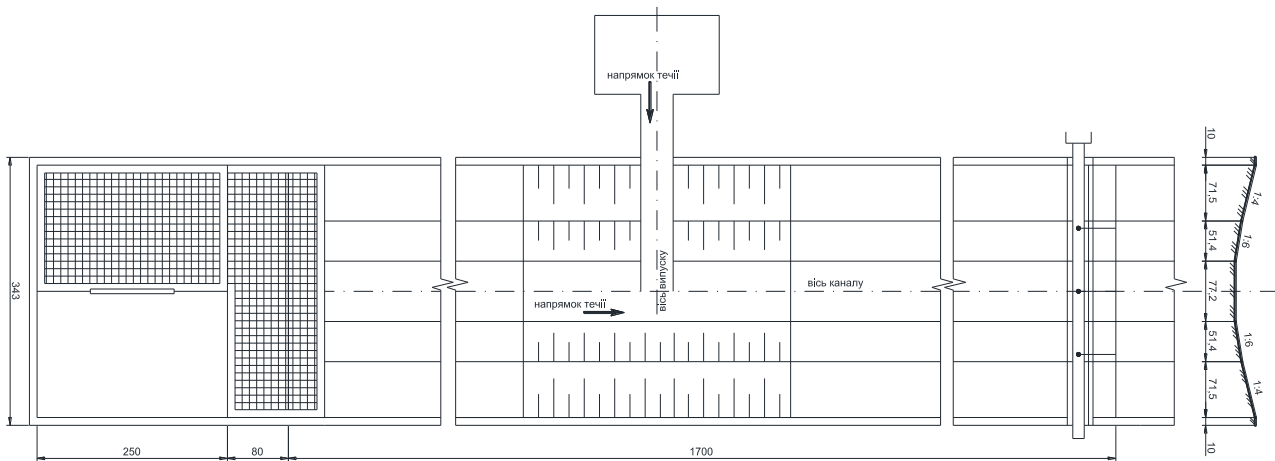


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки М 1:70

Впускна споруда виконана з текстоліту і дерева. Лоток і водобійні частину випуску розміщуються в межах касети з однорідного піску, що розмивається, із середнім діаметром частинок $d_{cp} = 1,4$ мм. Касета призначена для фіксування зон найбільших місцевих розмивів і швидкостей в нижньому б'єфі споруди. Розмір касети уздовж осі лотка – 1,8 м, глибина – 0,15 м. Поверхня ґрунту касети при необхідності може закріплюватися шляхом нанесення тонкого шару цементу і змочування водою.

У головній частині лотка – водоприймальний резервуар, обладнаний заспокоюючими ґратами у верхньому і нижньому б'єфах, трикутним мірним

водозливом, п'езометром, який має голку-шпiцен-масштаб з ноніусом, що дозволяє брати відліки з точністю до 0,1 мм. Перед входом у канал падаючий струмінь заспокоюється в басейні глибиною 1,2 м. Поверхневі хвилі ефективно гасяться наплавними ґратами з розміром чарунок 0,1x0,1 м. Розмір решітки вздовж потоку – 1,2 м.

У головній частині впускної споруди розміщується водоприймальний резервуар із розмірами в плані 1,2x1,2 м і висотою 0,9 м. Резервуар має трикутний мірний водозлив, п'езометр, заспокійливі решітки. Вода, проходячи мірний водозлив, потрапляє в резервуар із розміром 0,51x1,20 м, де встановлені гасителі енергії. Далі потік надходить у лоток шириною 30,3 см, звідки надходить через випуск у канал.

Вимірювання миттєвих і осереднених швидкостей потоку виконувалося за допомогою однокомпонентного тензометричного пластинчастого датчика з прийомним елементом діаметром 5 мм і мікровертушки типу Х-6 з лічильником імпульсів.

Внаслідок проведених експериментів були отримані планові епюри розподілу швидкостей у вузлі злиття потоків (рис. 2 і 3).

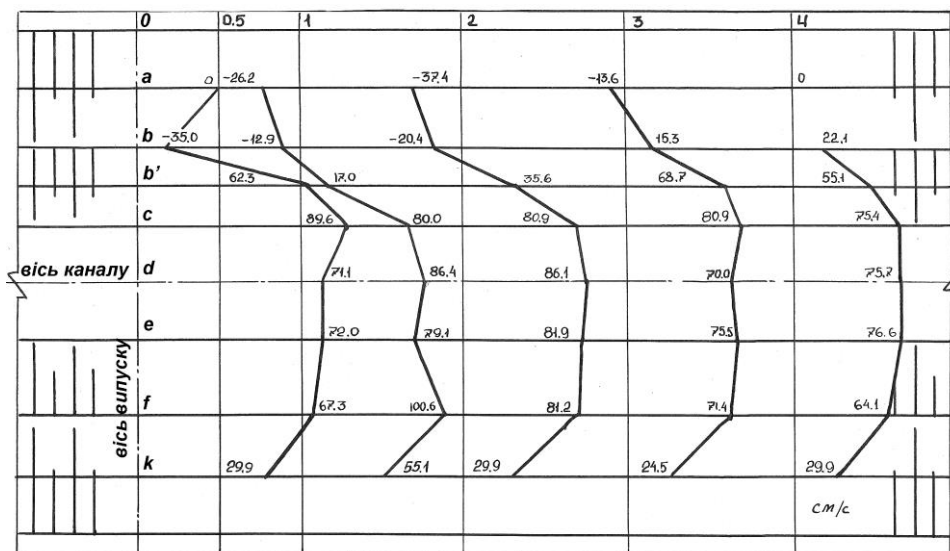


Рисунок 2 – Планові епюри осереднених за глибиною швидкостей у досліді №31

Результати даних досліджень підтвердили наявність трьох характерних зон у вузлі злиття відкритих потоків: 1) зони транзитного потоку, 2) зони

впадаючого в основний потік з водовпускної споруди притоку і 3) вихрової області.

У зоні злиття спостерігаються втрати енергії на поворот, які виникають головним чином через відрив потоку від внутрішньої стінки, що призводить до підтиснення струменя і подальшого його розширення.

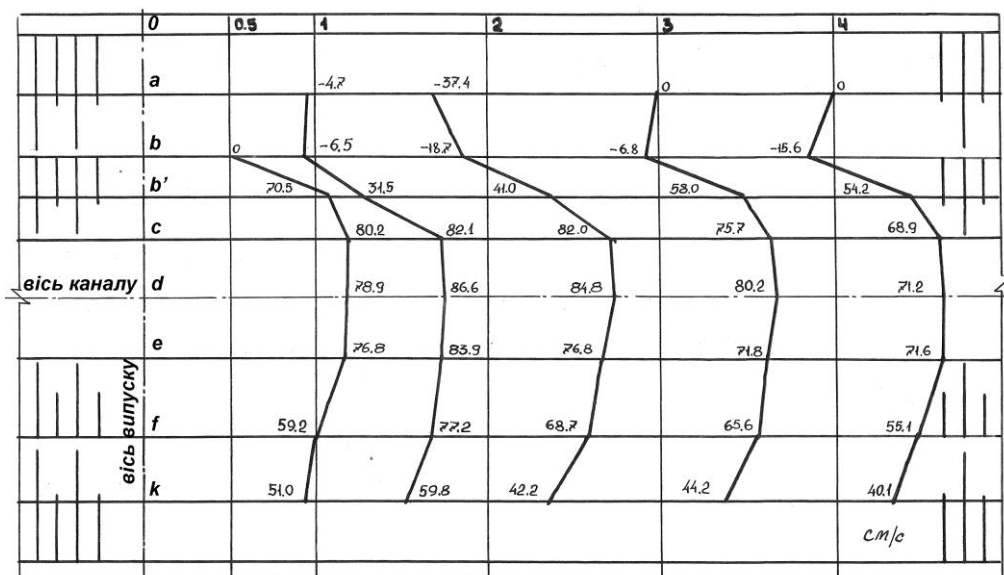


Рисунок 3 – Планові епюри осереднених за глибиною швидкостей у досліді №55а

Що стосується профілю вільної поверхні в області злиття, то тут можна відзначити наступне [4]: у верхній ділянці основного русла і притоці утворюються криві підпору; у вузлі злиття і нижній ділянці основного русла (до стиснутого перерізу) – криві спаду; нижче стиснутого перерізу – криві підпору, які за створом зникнення виру переходять у вільний профіль, який відповідає побутовим глибинам для сумарної витрати.

З метою дослідження структури внутрішніх течій, були побудовані ізотахи швидкісного поля для кожного досліду.

Турбулентний обмін по напрямку дотичної до ізотахи більше, ніж по напрямку до лінії градієнта. Кривизна ізотахи при обміні кількістю руху обумовлює відцентрову силу інерції, що викликає вторинний потік рідини. Цей потік тим більший, чим більша кривизна ізотахи. Отже, дослідження вторинних течій тісно пов'язано з дослідженням внутрішніх напружень [7].

Як видно з рис. 4 і 5, ближче до стінок спостерігається згущення ізотак, що свідчить про інтенсивну зміну дотичних напружень і, як наслідок, виникнення вторинних течій поперечної циркуляції. Це вказує на те, що саме біля стінок збуджуються і зароджуються основні вихори поперечних течій, і поле швидкостей завжди має просторовий характер.

Підтверджується висновок, що в потоці завжди мають місце вторинні течії у виді вихрових структур, що супроводжують основну течію і носять регулярний характер. Вони накладаються на основний потік і впливають на формування його швидкісного поля.

Аналізуючи досліди, можна помітити утворення замкнутих планових циркуляцій біля лівої стінки каналу нижче місця з'єднання потоків, де мають місце від'ємні значення поздовжніх швидкостей. Також в цих місцях спостерігається згущення ізотак при переході через 0. Ці явища можна пояснити відтисненням потоку від стінки внаслідок значних швидкостей і витрат випуску порівняно з основним каналом. В результаті зростають турбулентні дотичні напруження і поперечні циркуляції, а потік зазнає значного стиснення в зоні злиття, а потім розширення дещо нижче цієї зони. Під час стиснення швидкості зростають, а під час розширення – навпаки зменшуються.

По картині ізотак можна визначити характер і напрямок [2] поперечних течій. Напрямок вигину ізотак в плані, а також гострого кута ізотак при підході до стінки каналу вказують на напрямок поперечних циркуляцій (рис. 4 і 5). Лінії струменів вторинних течій є замкнутими кривими і визначають форму вихрових структур. Експериментальним шляхом встановлено [10], що форма вихорів у залежності від геометричних розмірів русла може мати вид еліпса з різними співвідношеннями осей.

Обробка даних експериментальних досліджень була виконана в Національному транспортному університеті на основі математичної моделі і методу її реалізації, запропонованих в роботі [13]. Розрахунки проводились для умов дослідів №31 та №55а. Дослід №31: витрата каналу $Q_k = 150$ л/с, витрата випуску $Q_e = 9,13$ л/с, глибина потоку $h = 18,57$ см. Дослід №55а: $Q_k = 150$ л/с, $Q_e = 4,57$ л/с, $h = 18,57$ см. Результати розрахунків наведені на рис. 6-13.

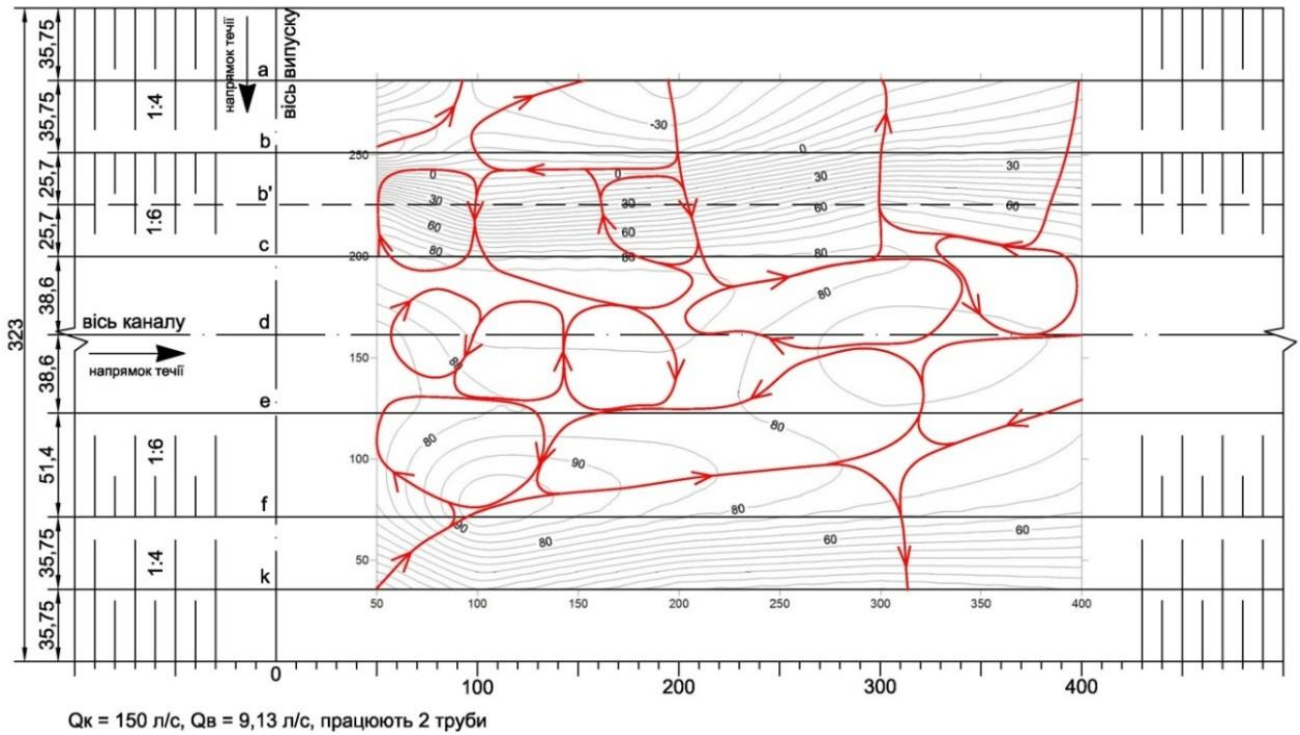


Рисунок 4 – Ізотахи осереднених за глибиною швидкостей в досліді №31 (розміри наведені в сантиметрах, швидкості – в см/с); стрілками показані напрямки внутрішніх течій

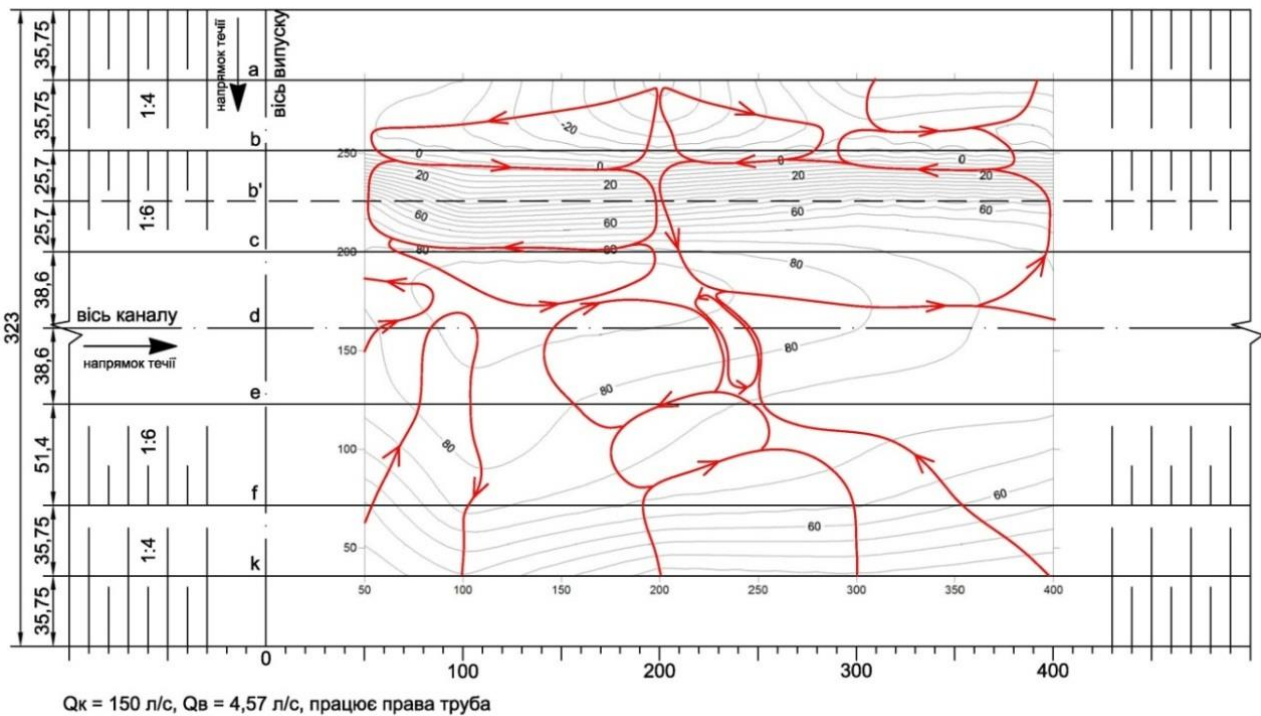


Рисунок 5 – Ізотахи осереднених за глибиною швидкостей в досліді №55а (розміри наведені в сантиметрах, швидкості – в см/с); стрілками показані напрямки внутрішніх течій

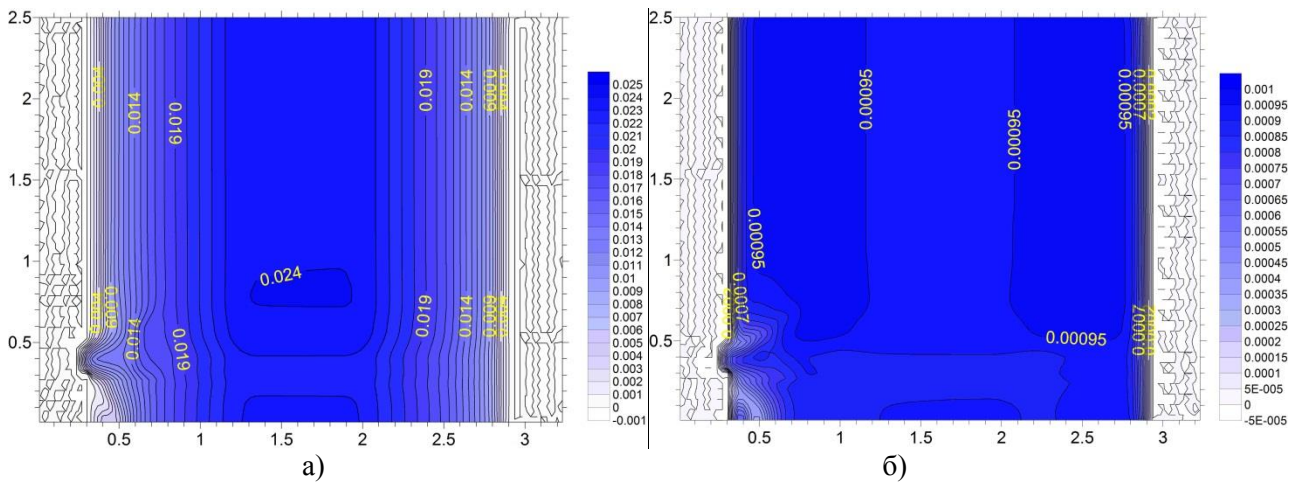


Рисунок 6 – Графік зміни гідродинамічних характеристик у досліді №31: а) графік зміни кінетичної енергії турбулентних пульсацій k ($\text{м}^2/\text{с}^2$); б) графік зміни швидкості дисипації ε ($\text{м}^2/\text{с}^3$) кінетичної енергії

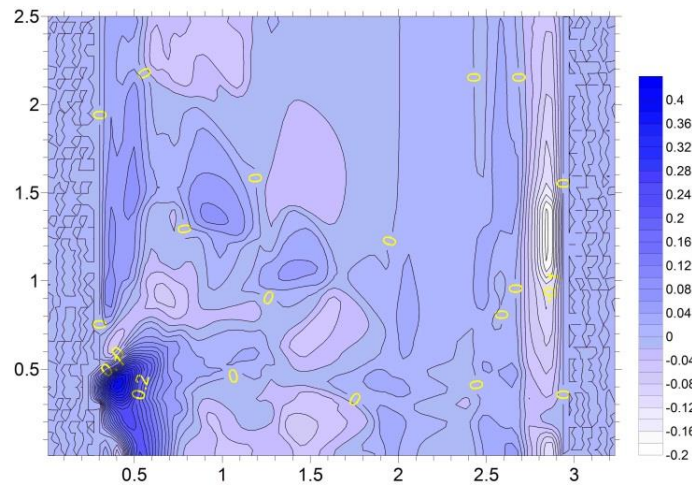


Рисунок 7 – Графік зміни завихреності Ω (с^{-1}) у досліді №31

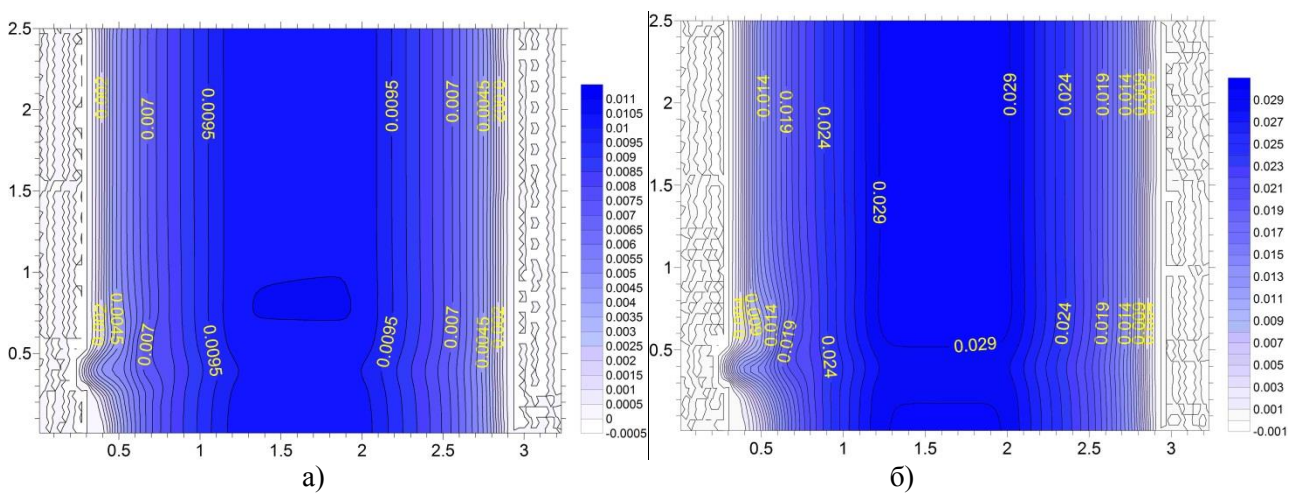


Рисунок 8 – Графік зміни гідродинамічних характеристик у досліді №55а: а) графік зміни дотичних турбулентних напружень $\overline{V'_x V'_y}$ ($\text{м}^2/\text{с}^2$); б) графік зміни нормальних турбулентних напружень $\overline{V'_x V'_x}$ ($\text{м}^2/\text{с}^2$)

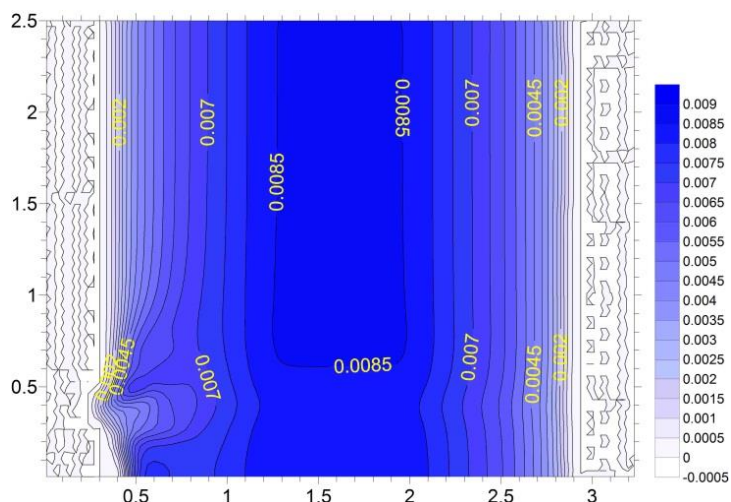


Рисунок 9 – Графік зміни нормальних турбулентних напружень $\overline{V_y'V_y'}$ (m^2/s^2) у досліді №55а

Перенесення кінетичної енергії турбулентних пульсацій k (рис. 6, а), розподіл швидкості її дисипації ε (рис. 6, б) і зміна нормальних турбулентних напружень $\overline{V_x'V_x'}$ (рис. 8, б), $\overline{V_y'V_y'}$ (рис. 9) відповідають характеру зміни поздовжньої швидкості. Це підтверджує вплив внутрішніх течій на розподіл як кінематичних, так і турбулентних характеристик потоку, які зумовлюють його анізотропний стан. Аналізуючи графік зміни дотичних турбулентних напружень $\overline{V_x'V_y'}$ (рис. 8, а), можна відзначити, що найбільший вплив на перенесення дотичних рейнольдсових напружень здійснює область перепадів глибини при переході русла на заплаву.

Графік зміни завихреності Ω (рис. 7) показує наявність у потоці додатних і від'ємних вихорів, чергування яких відбувається за рахунок стиснення потоку при злитті. Інтенсивність додатних вихорів переважає. А за розташуванням і формою від'ємних вихорів можна встановити області з рециркуляційними течіями та зону впливу стиснення.

Висновки

Проектування мостових переходів із груповими отворами має особливу складність, тому що в цьому випадку задача потребує детальної оцінки і врахування цілого ряду властивостей як руслового, так і заплавного потоків у вузлах розгалуження. Явища поділу і злиття вносять суттєві зміни в

гідродинамічну структуру потоку, що призводить до появи значних вихрових ділянок, викривлення потоку в плані, розвитку внутрішніх течій поперечної циркуляції, зміни рівня вільної поверхні у вузлах. Наслідком впливу наведених факторів є стрибкоподібна зміна глибини потоку та відповідно розвиток руслових деформацій, які порушують нормальні умови експлуатації мостових споруд.

Література

1. Дупляк В. Д. Гидравлические исследования устьевых сооружений. Автореф. дисс. канд.техн.наук: 05.14.09. – Киев. – 1975. – 24 с.
2. Железняков Г. В. Пропускная способность русел, каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
3. Караушев А. В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат. – 1969. – 416 с.
4. Мухамедов Д. А. Гидравлика узлов сопряжения открытых потоков. Автореф. дисс. докт.техн.наук. – Москва. – 1993. – 48 с.
5. Роди В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений. – М.: Мир, 1984. – С. 227-322.
6. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. – Киев: Идат-во АН УССР. – 1957. – 187 с.
7. Савенко В. Я., Славинская Е. С. Моделирование процессов развития внутренних течений с учетом анизотропии открытых турбулентных потоков. – К.: НТУ, 2004. – 176 с.
8. Славінська О. С. Врахування впливу внутрішніх течій на процеси у придонній області відкритого неоднорідного потоку / О.С. Славінська // 63 науково–практична конференція науково–педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. – К.:НТУ, 2007. – С. 102.
9. Славінська О. С., Козарчук І. А. Дослідження розвитку відривних течій при розгалуженні русел в зонах впливу мостових переходів з груповими отворами/ Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: НТУ. – Вип. 83. – 2012. – С. 95-97.
10. Спицын И. П. Влияние вторичных течений на формирование скоростного поля прямолинейного потока. – Труды ЛГМИ, 1967. Вып. 25, с. 33 – 40.
11. Шеренков И. А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков. – М.: Энергия. – 1978. – 240 с.
12. Щодро А. Е. и др. Определить пропускную способность сооружений на пересечении трассы главного канала переброски с временными и постоянными водотоками различной категории и дать рекомендации по их проектированию и эксплуатации. Отчет о НИР. УДК 636.532. – Ровно: УИИВХ, 1985. – 123 с.
13. Slavinska, O. and Kozarchuk, I. (2014) Research of internal currents in the node of branching river flows. The Advanced Science Journal. (10). pp. 56-63. DOI: 10.15550/ASJ.2014.10.056.